

# LA COMUNICACIÓN DE LOS PRÓXIMOS AÑOS

J.A. Martín-Pereda

Sistemas más compactos y menos sensibles a influencias externas

**JOSÉ A. MARTÍN-PEREDA**  
Catedrático de Tecnología Fotónica en la ETS de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid.  
Académico de número de la Academia de Ingeniería de España.

A nuestro alrededor, de vez en cuando, surgen productos o servicios que parecen surgidos de la nada. Es como si, de pronto, alguien hubiera tenido una nueva idea y, por arte de magia, la hubiera puesto en marcha.

La realidad es que casi nunca las cosas se desarrollan así. Para que una tecnología avance en una determinada dirección es necesario que antes, quizá durante muchos años, se hayan ido desarrollando los conceptos que le sirvan de base y se hayan ensayado en los laboratorios modelos que unas veces han funcionado y otras no. Las comunicaciones son un ejemplo palpable de esto.

Las comunicaciones que se usarán en los próximos años serán el resultado de muchos desarrollos que aun no han salido a la luz pública y que sólo los especialistas en el tema conocen hoy. Pero aunque sólo lleguen a emplearse dentro de unos años, aunque no han salido a la luz pública, existen ya. Algunos de estos desarrollos se basan en la introducción de conceptos derivados del uso de dispositivos que trabajan con

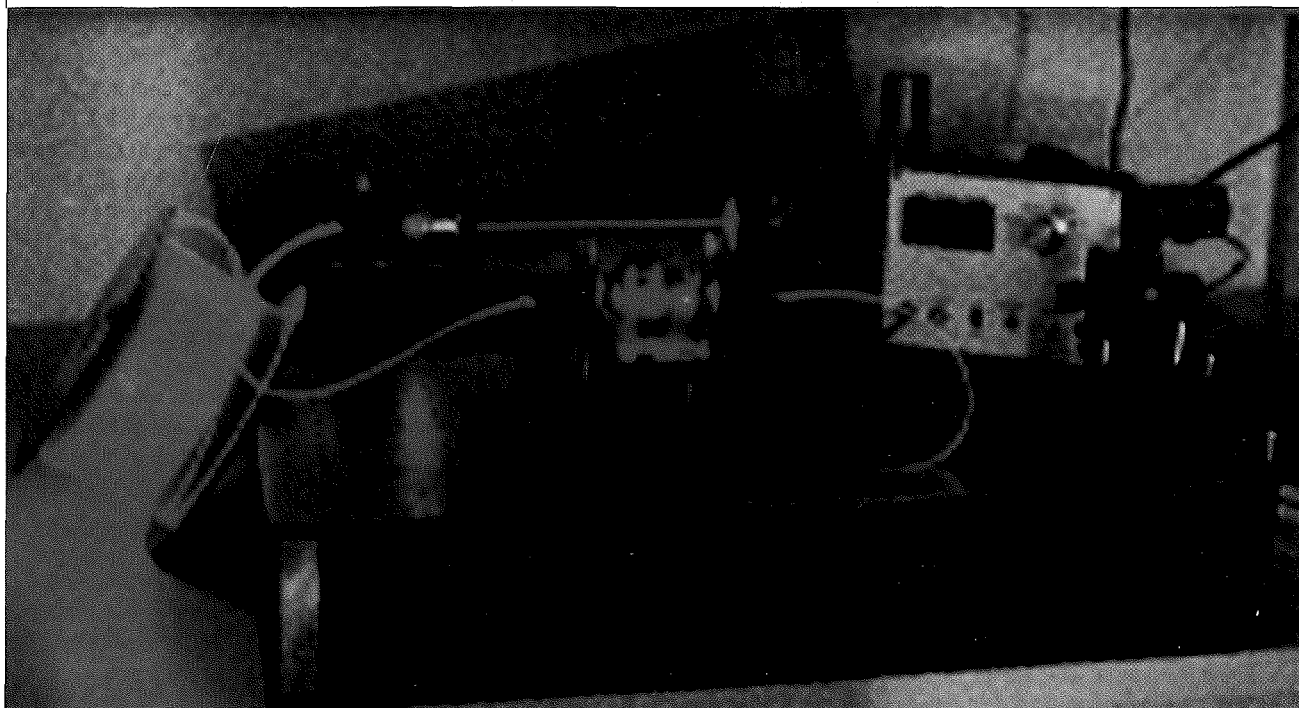
luz en lugar de con electrones, como lo hacen la mayoría de los usados hoy. Entre las aplicaciones más claras que pueden apuntarse para este nuevo campo está el de las centrales telefónicas. Pero muchos otros despuntarán en los próximos años. El objetivo de este artículo es avanzar algunos de esos conceptos que serán comunes en el próximo futuro y que, en muchos casos, tienen ya una larga vida tras de sí.

Muy pocas veces se piensa, cuando nos sentamos ante la pantalla de un ordenador, en quién es el que verdaderamente obedece y ejecuta las órdenes que damos al escribir algo en el teclado. Cuando usamos un procesador de textos, como el que ahora empleo para escribir estas líneas, y apretamos una tecla con una letra, jamás nos preguntamos qué está ocurriendo en el interior para que ésta aparezca en la pantalla. Tampoco nos importa mucho. Lo que cuenta es el resultado y éste lo tenemos, ante nosotros, en la pantalla. Quizás, en algunos casos, a lo más que llegamos es a recordar que en el ordenador hay un programa que determina qué es lo que corresponde hacer ante cada acción externa. Sabemos que hay un programa porque en algún momento se cargó en el disco duro. Alguien lo diseñó y, gracias a él ahora estamos escribiendo. Del

resto, apenas nos preocupamos. Teclas, algunas luces que se encienden de vez en cuando, algo que suena dentro,... Da igual. El ordenador funciona y eso basta.

Algo equivalente ocurre con el teléfono. La acción de marcar un número y el hecho de que, pasados unos instantes, a través del auricular nos llegue la voz de la persona con la que deseamos hablar, es algo rutinario, algo que a nadie sorprende. Nos da lo mismo que esa persona esté en nuestra misma casa o al otro lado del mundo. Nos resulta natural tanto la conversación como el que la voz que escuchamos sea casi igual que la que oíríamos frente a frente. Lejanos quedan ya los días en los que era preciso pedir una conferencia a la operadora y esperar varias horas para que pudiera conseguir línea. Muy pocos se acordarán ya de aquello y muchos más, incluso, no podrán recordarlo porque nunca formó parte de sus vidas.

¿Qué es lo que hace posible lo anterior? ¿Qué es lo hay detrás de muchas otras cosas que son habituales en nuestra vida diaria? En la base de casi todo ello se encuentra una serie de componentes, en la mayor parte de los casos electrónicos, que trabajan realizando todo el conjunto de operaciones que son necesarias para alcanzar el fin deseado. Muy pocas veces adquieren un papel pro-



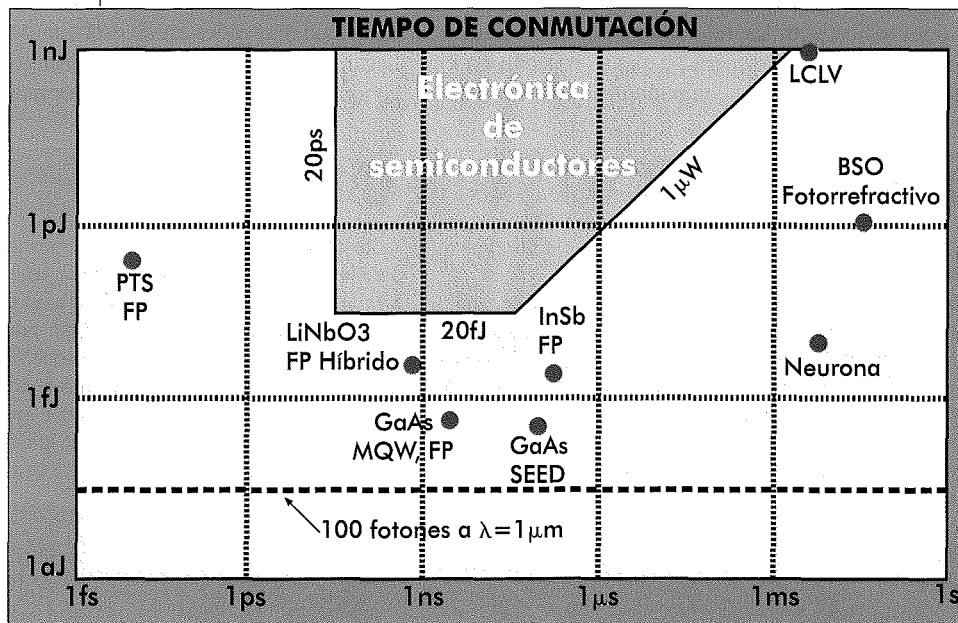
**Figura 1.**  
Montaje experimental de un Sistema de comunicación óptica.

tagonista en nuestras acciones. El único momento en el que tenemos constancia de su existencia es cuando se estropean y alguien nos comunica que tiene que cambiar alguno de ellos por otro nuevo. Es posible que la curiosidad nos lleve a preguntar qué función cumple esa peque-

que no sepamos muy bien cuáles son los principios en los que se basa, posiblemente llegaremos a intuir qué es lo que se nos avecina para mañana.

Uno de los campos en los que se está produciendo un mayor desarrollo de nuevos productos es el de las Comuni-

caciones. Resulta por ello importante acercarnos a algunos de los avances que se están generando en este terreno si queremos saber lo que serán las comunicaciones del futuro. Ése será el objetivo de las próximas páginas.



**Como en todos los campos de la ciencia y de la tecnología, los nuevos desarrollos se van asentando sobre conceptos nuevos y técnicas asentadas**

Todo desarrollo se basa, por lo general, en el aprovechamiento de conceptos y técnicas usadas con anterioridad. Como decía Lucrecio en *De Rerum Natura*: «Nil posse creari de nilo» («Nada puede crearse de la nada»). Todo tiene su raíz en algo. De unas cosas salen otras. La generación espontánea no es la forma que tienen la Ciencia y la Tecnología de evolucionar. Aunque un descubrimiento pueda suponer una ruptura con el pasado y el inicio de un nuevo camino, ese descubrimiento habrá necesitado, con toda seguridad, de algo que se ha desarrollado en años anteriores.

¿Cuáles son los precedentes de las comunicaciones que verán las próximas décadas? La base de todo lo que han sido las existentes hasta hoy, y también de las del mañana, se deriva de la teoría planteada por Maxwell en el siglo pasado y que se sintetiza en las ecuaciones que llevan su nombre. En algunos sitios, todo lo desarrollado a partir de ellas se designa como «la familia de Maxwell». Los abuelos en esa familia serían los desarrollos realizados en el siglo XIX y, más en concreto, todo el conjunto de sistemas generadores de potencia eléctrica. Los padres han sido, ya en el siglo XX, los avances nacidos de la Electrónica, tanto en lo que se refiere a la parte física, más conocida como *hardware*, como al soporte lógico, el *software*. Los hijos son, finalmente, el resultado de la conjunción de los anteriores conceptos con los derivados de la Óptica. Esa unión es lo que se conoce bajo el epígrafe de Fotónica. Estos hijos son los que están marcando el camino inicial para el siglo XXI.

Cabría preguntarse, para complementar lo anterior, qué jalones han marcado el desarrollo de las Comunicaciones desde sus orígenes. El camino que se ha seguido es el de una evolución que tiene mucho que ver con la evolución biológica de las especies. De un empleo casi exclusivo de la mecánica se pasó al de la electricidad. A través de ella se accedió a la Electrónica y finalmente, con ella y con la óptica, se ha llegado a

## FIBRAS ÓPTICAS DOPADAS CON TIERRAS RARAS

La mayor parte de las fibras ópticas usadas en comunicaciones son elementos pasivos. Esto quiere decir que la luz de baja potencia que pasa por ellas, que es la que normalmente se transmite, no sufre ninguna modificación en sus propiedades, salvo la de ser ligeramente atenuada con la distancia. Pero en los últimos años se ha desarrollado un nuevo tipo de fibra cuya parte central, denominada núcleo, aparece dopada con iones de tierras raras, por lo general erbio o niobio, que ya es capaz de amplificar la luz que pasa a su través.

La base de su funcionamiento es análoga a la de un láser convencional. Los iones empleados, cuando son bombeados mediante luz de una ciertas características, son capaces de situar un número elevado de electrones en niveles altos de sus configuraciones orbitales. Cuando pasa cerca de ellos otra radiación óptica de frecuencia apropiada, se induce el salto de éstos electrones a niveles inferiores, con la consiguiente emisión de luz, que es sumada a la inicial. Gracias a ello se aumenta el valor de la intensidad de la luz incidente, que a la salida será así mayor. La luz ha sido, en consecuencia, amplificada. El fenómeno que se produce es el mismo de la emisión estimulada de los láseres. En el caso de las fibras empleadas para comunicaciones, la luz que ilumina a la fibra para producir el bombeo tiene una frecuencia de entre 800 y 980 nanómetros ( $800-980 \times 10^{-9}$  metros) y la que es capaz de amplificar, de 1,54 micras ( $1,54 \times 10^{-6}$  metros). Ambas frecuencias se encuentran dentro del margen de radiaciones conocido como infrarrojo próximo.

**Figura 2.** Comparación de los márgenes de trabajo de los dispositivos semiconductores empleados en conmutación y los dispositivos fotónicos. Se incluye el punto de trabajo, aproximado, de una neurona, a efectos de comparación.

ña pieza que se ha estropeado. La respuesta será unas veces comprensible y otras no nos dirá nada. Pero el hecho fundamental es que sin ella, el ordenador, o el equipo de música, o el fax, no funcionaban. Sólo en ese momento tenemos constancia de su importancia.

Conocer qué es lo que hay dentro de un equipo o de un aparato puede resultar, en muchas ocasiones, necesario. Si se sabe algo de lo que ocurre en su interior, de cómo funciona, posiblemente puedan obtenerse resultados muy por encima de los que normalmente obtenemos. No es sólo entender por qué ha dejado de trabajar en la forma adecuada. O tener idea de qué parte hay que cambiar cuando algo ha fallado. Lo fundamental es comprender cuál es la filosofía que gobierna nuestro sistema. Si ésta se conoce, si sabemos cuáles son las limitaciones y las posibilidades de cada una de las partes que le componen, es seguro que podrán conseguirse prestaciones que, en otras condiciones, jamás llegarían a alcanzarse.

Por otro lado, y esto forma parte ya de otro nivel de conocimiento, si se analizan los componentes básicos que se están investigando en un campo tecnológico en un determinado momento, es posible que podamos conocer cómo será el futuro sistema que los incorpore. O dicho de otra forma: si conocemos algo de los nuevos dispositivos que se están desarrollando en un cierto sector, podremos llegar a tener una cierta idea de cómo será el mañana del mismo. Y aun-

la fotónica. Todo parece señalar que los próximos años vendrán determinados por lo que marquen los avances en este último campo. Una definición muy elemental de fotónica sería la de «tecnología capaz de generar, amplificar, detectar, guiar, modular o modificar las características de una radiación óptica mediante el empleo de efectos ópticos no lineales, así como cualquier otra forma de energía radiante cuyo elemento

ca será desbancada por la fotónica sino que ambas se complementarán tomando lo mejor de cada una de ellas para cada caso concreto. Es cierto, por otra parte, que habrá ocasiones en las que los conceptos fotónicos sustituirán con ventaja a los electrónicos. Es algo análogo a lo que ocurrió con el paso de las centrales telefónicas de conmutación electromecánica, que se basaban en el empleo de componentes como los relés,

campo. Pero muchos otros dispositivos han ido surgiendo a lo largo de la última década. La óptica integrada ha llegado casi a su madurez y la optoelectrónica integrada está viendo nacer un conjunto de circuitos que ya están introduciéndose en prototipos y centrales de comunicaciones de una nueva primera generación.

Pero el mayor desarrollo está aun por llegar. Cuando se habla, en términos generales, de comunicaciones ópticas

## RESONADORES NO LINEALES DE FABRY-PEROT

Los componentes basados en configuraciones de Fabry-Perot tienen una estructura básica como la que aparece en la figura. Están constituidos por un par de espejos cóncavos parcialmente transparentes, enfrentados el uno al otro, y que tienen sus ejes alineados. En el centro de ambos se sitúa un material cuyas propiedades sean las adecuadas para la forma de trabajo que se desee. En el caso de empleo como dispositivos biestables la propiedad más importante que deberán poseer es la de poder variar su índice de refracción con el valor de la intensidad óptica que pasa por su interior.

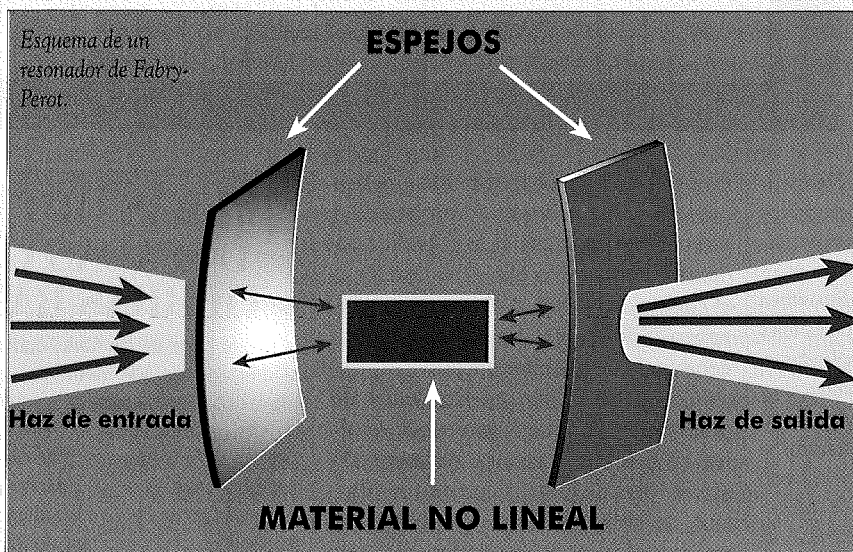
Si se hace pasar un haz de luz a través de esta estructura, debido a la presencia de los espejos, éste iniciará una serie de reflexiones entre sus caras. Cuando se cumplen unas determinadas condiciones entre el valor de la separación entre las caras de los espejos, el índice de refracción del medio situado entre ambos y la longitud de onda de la luz que incide, parte de la radiación óptica que ha entrado por un lado de la estructura, saldrá por el otro. Para cualquier otro conjunto de valores de esos parámetros dará un resultado diferente: la luz que ha entrado por un lado no será capaz de atravesar la estructura y volverá por el camino de entrada.

El ejemplo de una situación ideal nos puede ayudar a comprender mejor el fenómeno. Supongamos que la condición indicada antes para que salga luz por el lado opuesto al de entrada se cumple para una radiación de color verde. Si inicie una luz roja, ésta «rebotará» sobre la estructura y volverá por donde vino. Igual pasará con luces de otros colores. Sólo aquella que sea verde pasará al otro lado. Se tiene, en consecuencia, un dispositivo que es capaz de seleccionar determinados «colores» de luz dejándolos pasar o no. O dicho de otro

modo: se tiene la posibilidad de discriminar unos colores.

Como es lógico, en un caso real no se tendrá una separación tan clara como la señalada en el caso anterior. En lugar de separar dos colores tan diferentes como el rojo y el verde, lo que en realidad se tiene son señales luminosas con características de «color» muy similares. Si se está trabajando en comunicaciones

materiales según la intensidad de luz que los atraviesen. Supongamos que ahora la luz es siempre del mismo color. Tomemos el caso de que los parámetros del sistema sean tales que, para intensidades de radiación pequeñas, el haz atraviese al Fabry-Perot y pase al otro lado. Si en un determinado momento a este haz se le superpone otro de intensidad mayor, tal que sea capaz de modificar el índice de



ópticas, los «colores» empleados están todos en el infrarrojo, esto es, nuestro ojo no será capaz de detectarlos. Pero la forma de trabajo será equivalente.

Si queremos ahora hacer que esta estructura altere su funcionamiento de acuerdo con nuestra voluntad, lo que deberemos hacer es que tenga un comportamiento biestable. Y para ello la solución más fácil que tenemos es la de aprovechar el cambio en el valor del índice de refracción que pueden tener ciertos

refracción del material, puede entonces darse la situación de que el resonador cambie sus condiciones y no permita el paso de esa radiación. Ésta, entonces, rebotará en el resonador y volverá por el camino de entrada. Dicho de otra forma: con luz hemos sido capaces de determinar qué sentido toma un haz láser. Se ha hecho que en un determinado momento salga por un extremo y en otro, rebote en la cara de entrada. Se ha controlado luz con luz, que era el objetivo que estábamos buscando.

fundamental es el fotón. El margen de aplicaciones de la fotónica se extiende desde la generación de energía a su detección así como a sus aplicaciones en comunicaciones y procesamiento de la información».

En ocasiones se intenta contraponer a la electrónica con la fotónica. Nada más alejado de la realidad. Como en todos los campos de la ciencia y la tecnología, los nuevos desarrollos se van asentando sobre conceptos nuevos y técnicas asentadas. La electrónica nun-

a las electrónicas, en las que las operaciones activas se desarrollan por medio de transistores o circuitos integrados. La situación ahora puede ser análoga. La aparición de las fibras ópticas marcó el inicio de las comunicaciones ópticas y con ellas el comienzo de la introducción de componentes que podían trabajar con fotones en lugar de con electrones. El más emblemático ha sido sin duda el láser que, aunque había nacido varios años antes que las fibras, ha tenido una de sus mayores aplicaciones en este

cualquiera que sea ajeno al tema podría pensar que sus características eran que todo en ellas es óptico. Mas esto no es así. Las comunicaciones ópticas, tal y como están en uso hoy, sólo tienen óptica en el emisor, que es un láser o un diodo emisor de luz, en la fibra óptica, por la que discurre la luz generada por aquél, y en el receptor, un fotodiodo que convierte la señal óptica en eléctrica. El resto es, prácticamente, idéntico a cualquier otro sistema de comunicaciones tradicional.

La pregunta que aquí debemos plantearnos es la de qué ventajas tiene trabajar con luz en lugar de con fotones. No voy a entrar en todo el conjunto de hechos que rodean a la transmisión de luz por una fibra y que sirven de base para su empleo en diversos entornos: la gran cantidad de frecuencias que es capaz de transmitir, su inmunidad ante interferencias de campos electromagnéticos externos, su poco peso, ... Todo ello ha sido tratado ya desde hace muchos años y no constituye ninguna novedad volver a traerlo aquí. Lo que sí, en cambio, puede suponer una cierta novedad son algunos de los componentes que se están estudiando. A algunos de ellos dedicaremos los siguientes apartados.

### Dispositivos fotónicos capaces de proporcionar unas ventajas de ahorro de energía y de velocidad

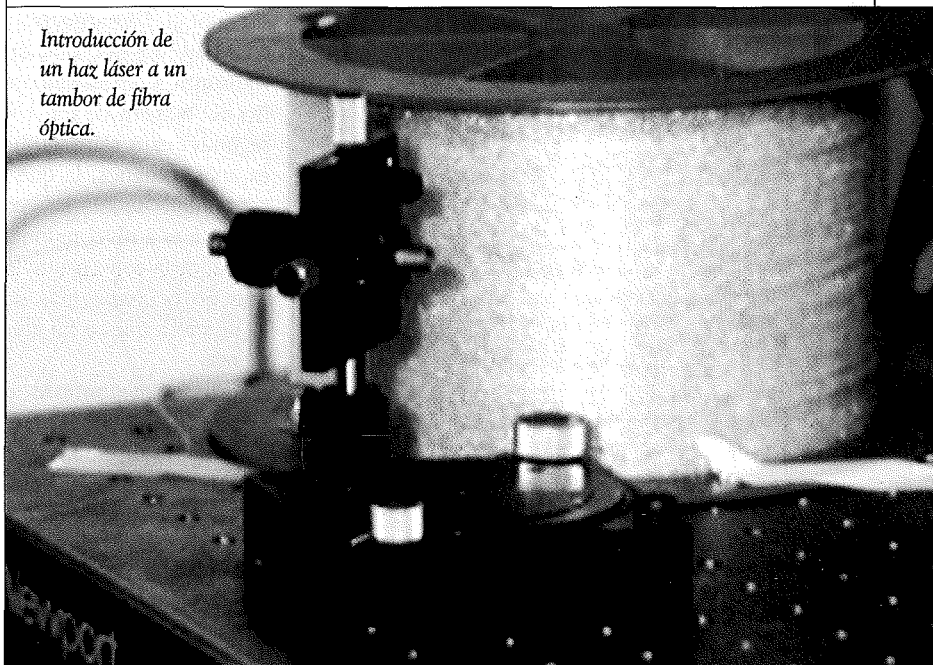
A finales de la década de los setenta, cuando las ventajas de los dispositivos puramente fotónicos sobre los electrónicos empezaban a ser consideradas, P. Smith, miembro de los entonces Laboratorios de la Bell, publicó un artículo considerado hoy como clásico en el que analizaba los límites físicos que podrían alcanzarse con los distintos tipos de componentes entonces en uso. Los más conocidos eran, en ese momento, tres: los basados en los semiconductores, los que usaban conceptos derivados de la superconductividad y los totalmente ópticos. Estos límites físicos tienen que ver con aquellos valores que por motivos puramente fundamentales no es posible sobrepasar. A modo de comparación podíamos plantear el caso de la velocidad a la que se puede desplazar cualquier vehículo diseñado por el hombre. Un cohete, dependiendo del grado de desarrollo de la tecnología que se emplee, podrá sobrepasar varias veces la velocidad del sonido, podría llegar a volar a 10.000 kilómetros por hora, quizás a 10.000 kilómetros por segundo. Pero jamás, por muy sofisticada tecnología que se emplee, por muchos avances que se logren en el desarrollo de sistemas de propulsión, llegará a volar más ligero que la velocidad de la luz. Ése es su límite físico y jamás podrá superarlo. Igual ocurre con los dispositivos analizados por P. Smith. El resultado de su estudio aparece sintetizado en la figura 2 en la que, conjuntamente con dichos límites, aparecen algunos de los dispositivos que ya se han desarrollado y que más adelante veremos. Esta figura, por su importancia, merece un comentario que la aclare.

Dos son los principales parámetros que determinan la bondad de un dispositivo para su aplicación en comunicaciones o en computación: la velocidad con la que es capaz de trabajar y la energía que consume. Estos dos parámetros son los que aparecen indicados en los ejes de coordenadas de la figura. En abscisas se dan valores de la velocidad de conmutación de un dispositivo para pasar de un estado a otro. Si, como es normal hoy, la forma de trabajo es digital, los dos estados posibles serán un nivel alto, que se corresponderá con un «1» y un nivel bajo que será el «0». El paso de uno a otro requerirá un cierto intervalo de tiempo, por ejemplo, 1 milisegundo (0,001 segundos) o 1 microsegundo (0,000001 segundos). Este tiempo de conmutación conduce, de forma directa, a la velocidad a la que se puede transmitir una determinada información. Si necesita 1 ms para cambiar de estado, muy difícilmente podrá superar una velocidad de envío de bits superior

emplean tienen también un consumo muy pequeño.

De acuerdo con lo anterior, en la figura puede verse el margen de actuación que tienen los dispositivos electrónicos basados en semiconductores, como son la gran mayoría de los actualmente en uso. Puede apreciarse que por debajo de 20 picosegundos ( $20 \times 10^{-12}$  segundos) será muy difícil que lleguen a trabajar. Igual ocurre con la energía: el mínimo con el que serán capaces de actuar se encuentra en torno a los 20 femtojulios ( $20 \times 10^{-15}$  julios). Por el contrario, fuera de la región marcada se encuentran una serie de puntos que indican zonas en las que ya están trabajando dispositivos fotónicos. Como puede apreciarse, la mínima energía, por el momento, la ofrece el dispositivo que en ella se ha denominado con las siglas «GaAs SEED» (Dispositivo de Efecto AutoElectroóptico de Arseniuro de Galio). De igual manera, la velocidad más pequeña de conmutación la ofrece

*Introducción de un haz láser a un tambor de fibra óptica.*



a 1000 bits por segundo. Menores velocidades de conmutación implicarán mayores velocidades de transmisión.

Conjuntamente con este dato es necesario también saber qué energía se ha requerido para efectuar ese paso de un «0» a un «1» o viceversa. No será lo mismo invertir 1 julio que invertir 0,000001 julios. El que, por ejemplo, se pueda disponer de calculadoras de bolsillo, del tamaño de una tarjeta de crédito y que funcionen con cuatro células solares de pequeño tamaño se debe a que los circuitos que las componen tienen un consumo energético muy reducido. Los teléfonos móviles, tan en uso desde hace algunos años, han sido posibles, entre otros factores, a que los circuitos que

el «PTS FP» (resonador de Fabry-Perot con Diacetileno Polimerizado en su interior). A modo de curiosidad se indica dónde se encuentra, aproximadamente, la neurona. Como puede verse, el tiempo de respuesta de ésta es muy lento pero, en cambio, la energía que precisa para trabajar está entre las más pequeñas que pueden encontrarse en los mejores dispositivos fabricados por el hombre.

Vemos así que, en principio, los dispositivos fotónicos parece que van a ser capaces de proporcionar unas ventajas de ahorro de energía y de velocidad que muy difícilmente podrán alcanzarse con otros componentes. Esto les da una primera ventaja que justificaría el que nos



detuviéramos en ellos durante un momento. Pero antes es preciso poner de manifiesto otro de los hechos esenciales que dan ventaja a trabajar con luz frente a trabajar con electrones. Es la capacidad de poder manejar información en paralelo frente a la forma en serie que es como lo hacen los sistemas electrónicos convencionales. Este modo de trabajar es idéntico a la manera por la que nuestro sistema visual recibe información de todo el espacio que se encuentra frente a nuestros ojos. No requiere ir muestreando la imagen punto a punto, como se hace en los sistemas

información en paralelo la situación podría ser muy diferente. Con una matriz de 1000 x 1000 dispositivos y cada uno de ellos con una velocidad de respuesta de tan solo 1 ms, se podría alcanzar la misma transferencia de información. O dicho de otra forma: los dispositivos que se empleasen podrían ser mucho más lentos. Esto es una ventaja innegable ya que podrían ser componentes mucho menos sofisticados y por consiguiente más baratos.

Pero si al mismo tiempo que se maneja el concepto de paralelismo se aprovechan las ventajas de los dispositivos fotónicos que aparecen en la figura 2, el resultado final sería mucho más espectacular. Supongamos que empleamos dispositivos del tipo de los de AsGa que aparecen en ella. Una velocidad no difícil de alcanzar con ellos es 30 ns. Si se dispusiera una matriz cuadrada que contuviera 10.000.000 elementos de conmutación basados en este efecto, la superficie que los contendría, con los límites de integración actuales, no sería superior a 1 centímetro cuadrado. La cantidad de información que podría transmitir se encontraría entonces dentro del margen de los  $3 \times 10^{14}$  bits por segundo. Esta cantidad de información es, más o menos, la que ocupan en la actualidad todas las conversaciones telefónicas a nivel mundial. Y todo ello se realizaría con un simple componente que no ocuparía más del centímetro cuadrado a que se ha aludido anteriormente.

Cabría preguntarse qué potencia sería necesaria para manejar esa cantidad de información. Si nos situamos en el límite de unos 1000 fotones necesarios para conseguir la conmutación de un estado a otro, se vería que la potencia no sobrepasaría el valor de 0,1 vatio.

Estos valores justifican cualquier estudio que se haga de los mismos, aunque solo sea con afán de intentar ver qué puede pasar en el futuro.

### La luz habrá sustituido con toda ventaja a la corriente eléctrica que circula hoy por las líneas telefónicas

Ya hemos visto que con los dispositivos fotónicos podían conseguirse, en algunos casos, comportamientos más ventajosos que los que proporcionaban los electrónicos. La velocidad de respuesta y la posibilidad de procesar señales en paralelo se encontraban entre los más significativos. La pregunta que viene a continuación es la de en qué áreas esas ventajas son más notorias y en cuáles estarán presentes en los próximos años. La respuesta más directa es en comunicaciones ópticas y, posiblemente, en algunos entornos de la computación. Las razones en uno y otro caso son diferentes aunque, de hecho, tienen una misma idea en común: aprovechar las dos ventajas apuntadas antes. Veamos cómo pueden emplearse en ambos.

Las comunicaciones por medio de fibra óptica son algo ya usual en nuestros días. La mayor parte de los enlaces entre las grandes ciudades del mundo industrializado se hacen por medio de ellas y dentro de no mucho llegarán incluso a nuestros hogares. Gracias a su presencia podremos recibir toda la información que necesitemos y seremos capaces de intercambiar voz, imagen y datos en tiempo real. La luz habrá sustituido con toda ventaja a la corriente eléctrica que circula hoy por las líneas

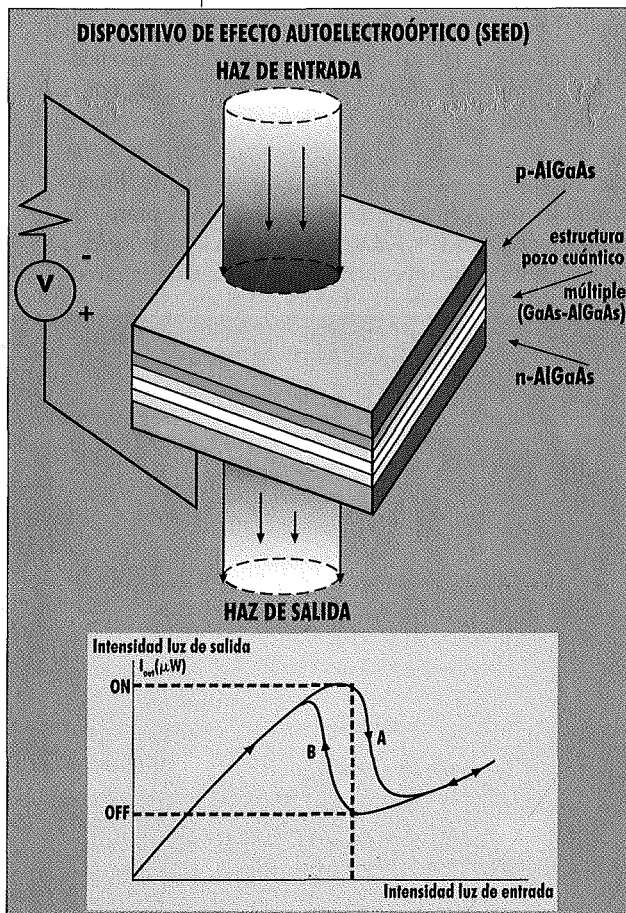


Figura 3. Estructura básica de un diodo pin basado en una estructura de pozo cuántico y curva característica del mismo.

de televisión actuales. Un sistema que funcionase de forma análoga a como lo hace el ojo podría procesar la información óptica de una forma mucho más rápida que si lo hiciera observando punto a punto qué es lo que tiene ante él.

Como ejemplo de la ventaja de lo anterior podría plantearse el siguiente caso hipotético, que no es sino una utopía todavía lejana pero que quizás en futuro no muy lejano podría acercarse a la realidad.

Supongamos un sistema que precisa enviar señales a una velocidad tal que precisase el empleo de un dispositivo con un tiempo de respuesta de 1 nanosegundo ( $10^{-9}$  segundos). Esto equivaldría a enviar señales a una velocidad de alrededor de 1.000.000.000 bits por segundo. Si se pudiera enviar la misma

## ¿QUÉ ES LA BIESTABILIDAD ÓPTICA?

Un componente, un circuito o, en general, cualquier sistema se dice que es biestable cuando únicamente tiene la posibilidad de presentar dos condiciones de salida. Los circuitos biestables han sido muy empleados en Electrónica, principalmente en aplicaciones derivadas de situaciones lógicas binarias, en las que los dos únicos posibles estados son el «1» y el «0». Gracias a ellos se han desarrollado la mayor parte de los ordenadores usados en nuestros días y constituyen el núcleo de sus circuitos.

La forma de trabajo de estos dispositivos es muy simple. Si la señal de entrada tiene una amplitud comprendida entre cero y un determinado valor, por ejemplo M, la salida es siempre «0». Entradas superiores a M darán una salida que será siempre «1», independientemente de que su magnitud esté muy próxima a M o sea mucho mayor. Si, posteriormente, la intensidad de la entrada, una vez alcanzado un máximo,

empieza a disminuir, el valor de la salida se mantendrá en «1» hasta que dicha intensidad esté por debajo de otro valor característico, que puede ser el M de antes o ser ligeramente distinto. A partir de ese momento, la salida será siempre «0». Como resultado de todo ello, un recorrido completo para un margen amplio de intensidades de entrada dará lugar a un ciclo de histéresis. Un biestable podría definirse así como un conmutador entre dos posibles posiciones, adoptando una u otra dependiendo de la señal que se haya aplicado a su entrada.

Si las señales de entrada y salida son radiaciones luminosas, por lo general haces láser, los dispositivos que tienen un comportamiento como el indicado se denominan biestables ópticos y su empleo puede abarcar desde puertas lógicas, memorias y conmutadores, para ordenadores ópticos, hasta sistemas capaces de encaminar señales, en comunicaciones ópticas.

telefónicas y también, en muchos casos, a las ondas electromagnéticas que emiten las antenas de radio y televisión. La sustitución no será nunca total, pero sí llegará a alcanzar porcentajes muy altos.

Pero la situación actual es que, a pesar de que la luz es la protagonista de la señal que se transmite, en los lugares en donde se decide el camino que debe seguir para alcanzar el destino deseado, el control sigue siendo electrónico. Los elementos básicos, las denominadas centrales de conmutación, están compuestas hoy por una serie de circuitos electrónicos que, tras analizar la cabecera de la información recibida, determinan la dirección que ha de tomar ésta. Así por ejemplo, una llamada que se ha originado en Madrid y que ha de llegar a Moscú, se inicia con una serie de números, los prefijos telefónicos, que indican ese destino final. Como es lógico, para llegar allí, por el camino irá alcanzando una serie de centrales intermedias. En cada una de ellas se busca el tramo siguiente que, en ese momento, sea el más conveniente seguir, bien por ser el más corto o por estar menos saturado de tráfico. Si ha llegado a la central de Barcelona, ésta determinará si el nuevo trayecto alcanzará París y desde

## DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES BASADOS EN POZOS CUÁNTICOS

Una estructura de pozos cuánticos está compuesta por un conjunto de láminas de material semiconductor con espesores del orden de algunos pocos decenas de amstrongs. Un amstrong es una medida de longitud que equivale a  $10^{-8}$  centímetros. Para tener una idea de su valor baste decir que el tamaño de un átomo, con su núcleo y órbitas, puede tener valores próximos a esa magnitud. La parte activa de un dispositivo basado en estas estructuras consiste en el apilamiento de un conjunto de esas láminas que llega a alcanzar un grosor total de alrededor de una micra, esto es, 0,000001 metros. Los materiales que las componen suelen ser arseniuro de galio y arseniuro de galio y aluminio, situados de forma alternada uno sobre otro. A este apilamiento hay que agregar dos láminas mucho más gruesas, una a cada lado del mismo, de semiconductores tipo p y n, que configuran así un tipo especial de diodo. La propiedad más importante de esta estructura, con vistas a la aplicación del presente artículo, es la de que su absorción de luz depende de la tensión eléctrica que esté aplicada entre las caras extremas del apilamiento antes mencionado. La absorción aumenta cuando la tensión aplicada a través de la célula disminuye.

La forma de trabajo de estos dispositivos se establece para un tipo de luz láser determina-

do. No todas las radiaciones luminosas de diferentes colores tienen el mismo efecto sobre la estructura anterior. Solo con una de ellas funcionará en la forma deseada. Cuando la señal óptica adecuada incide sobre el dispositivo, se genera en él una cierta corriente eléctrica que, debido a la forma como ha sido creada, se denomina "fotocorriente". Si no hay luz, esta fotocorriente no existe. El dispositivo se conecta entonces en serie con una resistencia y un cierto voltaje (véase la figura adjunta). Si no recibe radiación óptica, no genera corriente en el circuito y toda la tensión que proporciona la pila está aplicada en bornes de este dispositivo ya que, al no existir corriente que atravesase la resistencia, ésta es como si no existiese. Si, por el contrario, hay luz sobre la estructura, se genera una fotocorriente que, a su vez, da lugar a una caída de tensión en la resistencia y con ello a una disminución de la que existía en nuestro dispositivo. Esta menor tensión hace que aumente la absorción de luz. El resultado global del sistema es un fenómeno de biestabilidad óptica, como el que puede apreciarse en la figura.

Este tipo de fenómeno se denomina «Efecto Auto-Electroóptico» y, debido a ello, el dispositivo que lo emplea se conoce como SEED que son sus siglas en inglés: «Self-Electrooptic Effect Device».



Conexión entre fibras ópticas mediante acopladores.

allí se encaminará a Moscú o si, por el contrario, pasará por Viena. Las centrales de conmutación poseen así la misión de analizar parte de la señal que llega, ver si va por el camino deseado y, a continuación, volver a encaminarla. Todo ello se hace hoy por medio de técnicas que son una mezcla de electrónica convencional y de programas informáticos. En ningún momento la luz tiene algún papel. La señal óptica que ha llegado por la fibra a la central, se convierte en eléctrica y es ésta, la eléctrica, la que es analizada y procesada. Solo cuando va a emprender de nuevo el camino por la fibra es transformada otra vez en señal óptica. ¿Tiene sentido entonces llamar comunicaciones ópticas a unas comunicaciones en las que gran parte del proceso de transmisión es convencional? Parece que lo lógico sería que la luz no

fuera transformada en otro tipo de señal y que, durante el mayor tiempo posible, siguiera siendo sobre la que se hicieran muchas de esas decisiones a que se ha aludido antes. Ese es el fin de los componentes fotónicos: intentar que las ventajas posibles de la luz se mantengan operativas en todos los puntos donde sea posible.

Algo de lo anterior se está realizando ya en nuestros días tras la introducción en el mercado de las *fibras ópticas dopadas con tierras raras*. Estas fibras poseen la capacidad de poder amplificar la luz que pasa por ellas, siempre que ésta tenga las características adecuadas. Su aparición ha hecho desaparecer una de las etapas que antes eran obligadas en todo envío de información a través de fibras ópticas. ¿Qué problema han sido capaces de solventar? Ha sido, simplemen-

te, hacer que la intensidad que va perdiendo la luz según avanza por dichas fibras pueda ser recuperada periódicamente. Las señales ópticas que viajan por las fibras, al cabo de una cierta distancia, se han atenuado. El valor que tenían al entrar ha ido disminuyendo. Si esa señal siguiera viajando, al cabo de un tramo suficientemente largo de fibra, su intensidad se habría reducido tanto que sería imposible reconocer en ella la información que portaba. Es preciso, por tanto, efectuar una especie de regeneración que la vuelva a su situación inicial. Esa tarea la realizan de forma periódica, en cualquier sistema de comunicaciones, unos centros intermedios que, debido a la función que llevan a cabo, se denominan «regeneradores». Hasta hace no mucho estos centros, en el caso de comunicaciones ópticas, eran del mismo tipo que los descritos antes: recibían la señal óptica y la convertían a eléctrica. La analizaban por métodos puramente electrónicos y, finalmente, era transformada nuevamente en señal óptica con los valores de intensidad óptica adecuados. Las fibras amplificadoras han eliminado esta doble conversión. Situadas en aquellos puntos donde la señal ha empezado a deteriorarse, las fibras dopadas con tierras raras amplifican la señal óptica y, sin ningún tipo de apoyo electrónico, hacen que pueda volver a emprender el nuevo tramo,

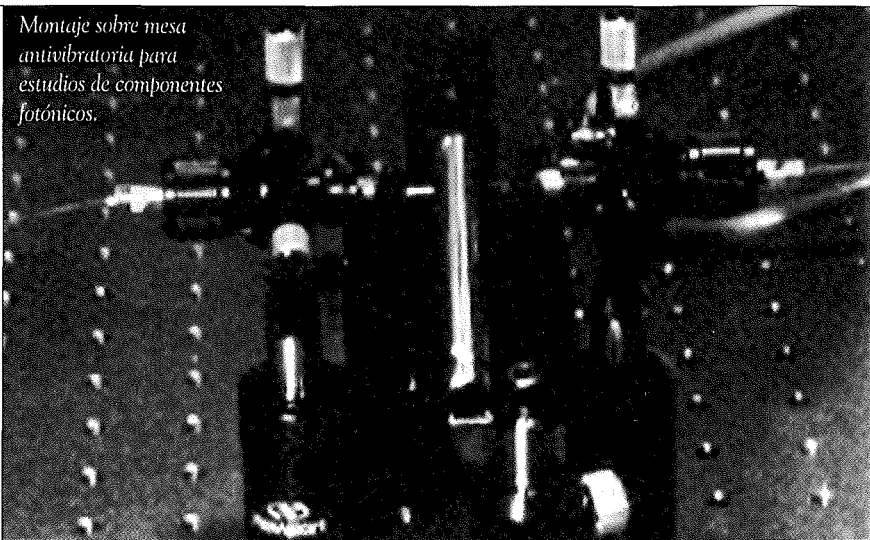
con unas características muy similares a las que tenía cuando inició su camino.

Pero si las fibras dopadas con tierras raras han sido capaces de ampliar el margen de actuación de la luz en un sistema de comunicaciones ópticas, los componentes que permitirían la realización de tareas como las apuntadas antes, esto es, las de control y encaminamiento de la información, no han alcanzado todavía una situación equivalente. Existe en este momento un conjunto muy importante de dispositivos que, en demostradores de laboratorio o de ensayos preliminares, están siendo probados como candidatos potenciales.

Los dos grupos más importantes se centran en torno a componentes que emplean las propiedades del interferómetro o resonador no lineal de Fabry-Perot y a los que su base se encuentra en las propiedades ópticas de materiales semiconductores crecidos en capas muy finas, conocidos como *dispositivos de pozos cuánticos*. En ambos casos, la raíz de su comportamiento es el cambio de las propiedades de un material según la intensidad de la luz que le atraviesa. Entre ellas, una de las más características es la de su índice de refracción y otra su capacidad de absorber, en mayor o menor medida, una radiación luminosa.

Ambas propiedades son casi imposible detectarlas a simple vista. En la mayor parte de los materiales que tenemos al alcance de la mano es prácticamente imposible notar ninguna variación en sus propiedades según pase o no luz a su través. La razón de ello es que los posibles cambios que pudieran surgir son tan pequeños que sin una instrumentación adecuada no pueden ser apreciados. Además, los cambios solo se producen para intensidades de luz relativamente elevadas. La existencia del láser facilita este segundo hecho. Aunque el valor absoluto la intensidad que puede proporcionar cualquiera de los empleados en comunicaciones es muy pequeña (casi nunca sobrepasan el valor de 1 milivatio, mientras que una bombilla usual en cualquier hogar suele tener del orden de los 100 vatios), las reducidas dimensiones en que se concentra hacen que la densidad de potencia sea muy grande. Ese milivatio que proporciona el láser suele estar concentrado en una superficie inferior a 1 milímetro cuadrado. Esto equivale a una densidad de potencia del orden de 1.000 vatios por metro cuadrado. Si con una lente se concentra esa radiación en una superficie que sea del orden de la longitud de onda de la radiación empleada, por ejemplo en un círculo de radio 1 micra (0,000001 m), esta densidad de potencia alcanza un valor de  $10^9$  vatios por

Montaje sobre mesa antivibratoria para estudios de componentes fotónicos.



metro cuadrado, valor muy superior al que puede conseguirse con cualquier otra fuente de luz convencional. Esta magnitud es ya capaz de poner de manifiesto esas variaciones del índice de refracción o de la absorción a que aludíamos antes.

Cuando estas propiedades se aplican a resonadores no lineales de Fabry-Perot o a estructuras semiconductoras de pozos cuánticos, se puede disponer de dispositivos capaces de controlar la luz que llega a través de una fibra óptica y encaminarla por la dirección que se desee. La base de su funcionamiento es la *biestabilidad óptica*, fenómeno que permite disponer de componentes fotónicos con comportamientos muy similares a los empleados habitualmente en Electrónica. Con su uso se habrá dado el primer paso para disponer de centrales de conmutación que sean totalmente fotónicas. Y también en otro terreno, para construir algunas de las partes de los futuros ordenadores ópticos.

### Se envían señales, a miles de kilómetros de distancia, sin que éstas apenas sufran ningún deterioro en sus características

La aplicación de la Fotónica al campo de las comunicaciones y la computación ópticas no queda reducida a lo que se ha mostrado en los anteriores párrafos. Existen muchos otros temas cuya presencia en los próximos años determinará nuevos avances en el intercambio de información y, quizá también, una nueva filosofía en el mismo concepto de las comunicaciones o del procesado de información.

Entre aquellos que quizá marcarán con mayor huella ese futuro desarrollo se encuentran el de la transmisión de solitones a través de fibras ópticas, el de las interconexiones ópticas en sistemas

de computación y el del procesado de imágenes mediante técnicas ópticas realizadas en dos dimensiones. Ninguno de todos ellos será tratado aquí. Solo, a modo de comentario, parece procedente mencionar ahora lo que parece es su señal de identidad más característica. De los primeros, los solitones, diremos que es posible que sean la punta del iceberg de un nuevo concepto en transmisión de información. Múltiples experiencias desarrolladas en los últimos años muestran la posibilidad de envíos de señales, a miles de kilómetros de distancia, sin que éstas apenas sufran ningún deterioro en sus características. Por lo que respecta a las segundas, a las interconexiones ópticas, puede decirse que podrán conseguirse, gracias a ellas, sistemas más compactos y mucho menos sensibles a las influencias de los factores externos. Finalmente, el procesado de información bidimensional permitirá manejar ésta a mucha mayor velocidad y, quizá, con una mayor efectividad. En cualquier caso, son temas cuya exposición precisa más espacio del que aquí disponemos hoy.

Para concluir es obligado mencionar un tema que, estos días, está en pleno desarrollo dentro de las comunicaciones. Es el que se refiere a las comunicaciones móviles. Es obvio que este tipo de intercambio de información no tiene mucho que ver con la fotónica, tal y como ésta se ha presentado aquí. Pero si en el futuro se intentan unir las grandes redes de comunicaciones basadas en fibra óptica con los terminales móviles que cada uno de nosotros tendrá a su alcance, será preciso plantear nuevas formas de trabajo que hagan compatibles ambas técnicas. Algunas de ellas se están ya empezando a desarrollar. Igual que antes, no es éste el momento de comentarlas. Es algo que puede quedar pendiente para una próxima ocasión.